

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-303836

(43)Date of publication of application : 18.10.2002

(51)Int.Cl.

G02F 1/01  
G02B 6/12  
G02F 1/015  
G02F 1/313

(21)Application number : 2001-106318

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 04.04.2001

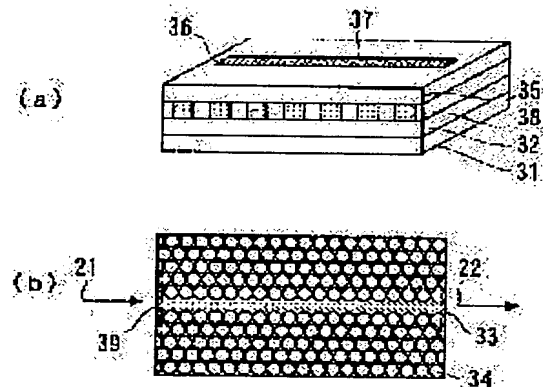
(72)Inventor : SHIRANE MASAYUKI  
TOKUSHIMA MASATOSHI

## (54) OPTICAL SWITCH WITH PHOTONIC CRYSTAL STRUCTURE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical switch which has a photonic crystal structure.

SOLUTION: This optical switch has a slab type optical waveguide, the core 35 of which has a two-dimensional photonic crystal structure wherein  $\geq 2$  kinds of media 33 and 34 having different refractive indexes are arrayed regularly and cyclically in two dimensions. The photonic crystal structure has a linear defective waveguide on a straight line and a means which varies the refractive index of the linear defective waveguide.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

12.02.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-303836

(P2002-303836A)

(43) 公開日 平成14年10月18日 (2002. 10. 18)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームコード* (参考)
G 0 2 F 1/01		G 0 2 F 1/01	F 2 H 0 4 7 A 2 H 0 7 9 C 2 K 0 0 2
G 0 2 B 6/12		1/015	5 0 5
G 0 2 F 1/015	5 0 5	1/313	

審査請求 未請求 請求項の数17 O L (全 11 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2001-106318(P2001-106318)

(22) 出願日 平成13年4月4日 (2001. 4. 4)

(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願 (科学技術庁平成12年度科学技術振興調整費による委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 白根 昌之

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(72) 発明者 徳島 正敏

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74) 代理人 100080816

弁理士 加藤 朝道

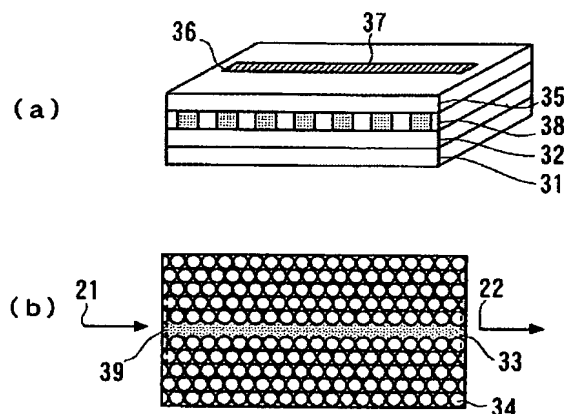
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶構造を有する光スイッチ

(57) 【要約】

【課題】 フォトニック結晶構造を有する光スイッチを提供する。

【解決手段】 スラブ型光導波路を有し、前記スラブ光導波路のコア35が、屈折率の異なる2種類以上の媒質33、34を2次元周期的に規則正しく配列した2次元フォトニック結晶構造を有する光スイッチであって、前記フォトニック結晶構造は直線上の線欠陥導波路を有し、前記線欠陥導波路の屈折率を変化させる手段を有する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】スラブ型光導波路構造を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる2種類以上の媒質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造からなる光スイッチであって、

前記フォトニック結晶構造が線欠陥導波路を有し、前記線欠陥導波路の屈折率を変化させる手段を有する、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項2】前記屈折率を変化させる手段が、電流注入における材料の屈折率変化を利用するものである、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項3】前記屈折率を変化させる手段が、電圧印加における材料の屈折率変化を利用するものである、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項4】前記屈折率を変化させる手段が、制御光の照射における材料の屈折率変化を利用するものである、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項5】前記フォトニック結晶構造において、前記線欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型干渉系が構成されており、2つの分岐された光路の一方または両方に導波路の屈折率を変調する手段を有する、ことを特徴とする請求項1記載の光スイッチ。

【請求項6】スラブ型光導波路構造を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる2種類以上の媒質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造からなる光スイッチであって、

前記フォトニック結晶構造は、入射光をフォトニック結晶の固有軸に対して斜めに入射することにより屈折させる手段と、

前記フォトニック結晶の屈折率を変化させる手段と、を有し、

前記屈折率の変化によって前記フォトニック結晶における屈折角を変化させる、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項7】スラブ型光導波路構造を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる2種類以上の媒質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造からなる光スイッチであって、

前記フォトニック結晶への入射光自身の強度変化に応じて、前記フォトニック結晶の屈折率が変化し、スイッチング動作を行う、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項8】スラブ型フォトニック結晶の線欠陥導波路を用いた光スイッチにおいて、

前記スラブ型フォトニック結晶のコア層は、i型、n型、又はp型の半導体であり、

前記コア層の、前記線欠陥導波路を挟んで両側に、n型領域とp型領域を有し、

前記n型領域とp型領域に、それぞれn型オーミック電極またはp型オーミック電極が形成されている、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項9】前記コア層の母材の導電型が、n型又はp型であり、

前記コア層の母材の導電型と同じ導電型の電極、及び、イオン注入領域が、前記線欠陥光導波路から離間して設置されている、ことを特徴とする請求項8記載の光スイッチ。

【請求項10】前記線欠陥光導波路が、前記フォトニック結晶構造において、屈折率の異なる2種類以上の媒質が周期的に規則正しく配列されていずに、同一媒質で少なくとも一列分置き換えられている領域が、光の入力端から出力端への伝搬経路に沿って延在されているものである、ことを特徴とする請求項1乃至9のいずれかに記載の光スイッチ。

【請求項11】基板上に設けられた第1のクラッド層と、

前記第1のクラッド層の上に設けられ、屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列されており、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有するコア層と、前記コア層の上に設けられた第2のクラッド層と、を有し、

前記フォトニック結晶構造は、前記第2の光学媒質が配設されていず、前記第1の光学媒質で置き換えられている領域が少なくとも一ライン分の幅で、光の入力端から出力端に向けて延在されている領域を有し、該領域が導波路をなしており、電流注入、逆バイアス電圧の印加、あるいは入射光とは別の制御光の照射により、前記導波路の屈折率を変化させ、前記入力端に入射された光の前記出力端からの出力をオン及びオフする、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項12】基板上に設けられた第1のクラッド層と、

前記第1のクラッド層の上に設けられ、屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有する、半導体よりなるコア層と、前記コア層の上に設けられた第2のクラッド層と、を有し、

前記コア層のフォトニック結晶構造は、前記第2の光学媒質が配設されていず、前記第1の光学媒質で置き換えられている領域が、少なくとも一ライン分の幅で、光の入力端から出力端に向けて延在されている領域を有し、該領域が導波路をなし、

前記コア層において、前記導波路を挟んで両側に、n型領域とp型領域が配設されており、それぞれの領域に、n型オーミック電極又はp型オーミック電極が形成されており、

前記第2のクラッド層表面の第1、第2の電極が、前記

n型オーミック電極、及び前記p型オーミック電極にそれぞれ電氣的に接続されている、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項13】分岐型干渉計構成の光スイッチにおいて、屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有し、前記フォトニック結晶構造は、前記第2の光学媒質が配設されていず、前記第1の光学媒質で置き換えられている領域が、少なくとも一ライン分の幅で延在されている領域を有し、該領域が導波路をなし、一本の前記導波路が、入力端から延在され第1のY分岐路によって2つの導波路に分岐されて延在され、第2のY分岐路によって合波されて一本の導波路として出力端にまで延在されており、前記2つの導波路に対応して設けられた電極より電流注入、逆バイアス電圧の印加を行うか、あるいは制御光の照射により、前記2つの導波路間の光信号を同相とするか、位相差を生じさせることで、前記入力端に入射された光信号の前記出力端からの出力をオン及びオフする、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項14】屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有し、外部導波路からの入射光は、前記フォトニック結晶の固有軸に対して斜めに入射され、前記フォトニック結晶中を伝搬する光は、前記フォトニック結晶の分散特性によって決定される一つのチャネル方向へ出力され、電流注入、逆バイアス電圧の印加、もしくは、入射光とは別の制御光の照射により、前記フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率が変化し、それに応じて、屈折角が変化することで前記フォトニック結晶中を伝搬する光が別のチャネルへ出力される、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項15】屈折率の互いに異なる少なくとも第1と第2の光学媒質を有し、前記第2の光学媒質は前記第1の光学媒質中で規則的に配列され、少なくとも2次元平面上で周期構造を形成するフォトニック結晶構造を有し、前記フォトニック結晶は、2次元平面内において、光の伝搬方向に垂直な方向が所定幅の導波路となっており、前記導波路の光の伝搬方向に沿ってその両側にはクラッド層を備え、入射光強度が小さい場合には光が前記導波路を伝搬して出射され、入射光強度がある程度強くなると、出射光の強度を制限するリミッター機能を有する、ことを特徴とする光スイッチ。

【請求項16】入射光強度が小さいときには透過光強度が小さく、入射光強度が大きくなると、透過光強度が増大するコントラスト増大機能を有する、ことを特徴とする請求項15記載の光スイッチ。

【請求項17】前記フォトニック結晶構造の周期構造が形成される2次元平面の表面と裏面側にクラッド層がそれぞれ設けられている、ことを特徴とする請求項13乃至15のいずれか一に記載の光スイッチ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は光スイッチに関し、特にフォトニック結晶構造を有する光スイッチに関する。

【0002】

【従来の技術】光通信においては、デジタル信号の0又は1に併せて光信号をオン・オフする仕組みが必要である。そのために最も単純な仕組みは光源に用いられる半導体レーザの出力そのものをオン・オフ制御する方法であるが、半導体レーザの出力を直接オン・オフする方法では、半導体レーザの発振安定性が悪くなることと、そもそも10Gbps（ギガビット／秒）以上の高速変調は困難である。

【0003】光信号をオン・オフするもう一つの方法として、光スイッチを用いる方法がある。これは、半導体レーザからの一定の光出力を後段に取り付けた装置によって変調してオン・オフする方法で、後段に取り付けられた装置は、光スイッチと呼ばれる。光スイッチを用いる場合、半導体レーザ光源の光強度は一定に保っておけるので、発振が不安定になる問題は解消される。また、半導体レーザ自体の変調速度には影響されない。

【0004】光スイッチは、従来、化合物半導体で構成され、動作原理として、

・多重量子井戸構造に電界を印加することによって実効的バンドギャップをレッドシフトさせる量子閉じ込めシュタルク効果を用いるもの、

・電流注入あるいは逆バイアス印加により活性層の屈折率変化を利用するもの、

・3次の非線形光学効果である光カー効果を利用するもの、

等が知られている。

【0005】この内、量子閉じ込めシュタルク効果を用いるものは、井戸層とバリア層との組み合わせによりある程度の設計自由度を有するものの、バンドギャップ・エネルギーなどの材料固有の性質が選択できる材料では限られ、動作波長範囲の制約を受けるといった問題点がある。

【0006】また、屈折率変化を利用するものは、利用できる屈折率変化が小さいため、オン・オフ時の信号光強度比を大きく確保するためには、数百ミクロン程度の長さが必要となり、高密度集積化の障害となっている。

【0007】光カー効果を利用する光スイッチは、高速化できる可能性が最も高い。しかしながら、光カー効果を起こすための高強度の制御光源が別途必要とされており、実用的では無い。

【0008】これらの問題点を解決できる可能性のある光スイッチとして、近年、フォトニック結晶を用いた光スイッチが提案されている。フォトニック結晶を用いた光スイッチに関する刊行物として、例えば特開平10-90638号公報には、複素屈折率の異なる2種類の光学媒質であって、少なくとも一方の光学媒質が半導体である2種類の光学媒質を含み、2次元平面上で周期構造を形成するフォトニックバンド構造と、前記2次元平面上に平行な被制御光と、被制御光の光路と直交しない光路に沿って前記2次元平面上の周期構造に円偏光の制御光を照射する手段を有し、制御光によって被制御光の通過率をスイッチする光スイッチの構成が開示されている。

【0009】フォトニック結晶とは、屈折率の異なる2つ以上の媒質が光の波長オーダー、すなわちサブ $\mu\text{m}$ 周期で3次元もしくは2次元周期的に規則正しく配列されたものであり、設計の自由度が大きく、特異な光学特性を有する人工光学結晶として注目を浴びている。

【0010】図1(a)に、このフォトニック結晶の構造の一例として、2次元フォトニック結晶を模式的に示す。これは、第1の媒質11に、2次元三角格子状に円柱形の第2の媒質12が埋め込まれた構造である。このようなフォトニック結晶においては、フォトニック結晶中に存在する光波に対して、エネルギーバンド構造を形成することが知られている。

【0011】図1(b)は、図1(a)の三角格子に対応する逆格子空間における第1ブリルアンゾーンである。正六角形の頂点がJ点、各辺の中点がX点、正六角形の中心が $\Gamma$ 点となる。

【0012】図2の実線は、図1(a)のフォトニック結晶の、TM偏波に対する $\Gamma$ -X方向のエネルギーバンド構造を計算した結果である。ここで、 $a$ は格子ピッチ（又は格子定数）、 $c$ は真空中での光速、 $\omega$ は光波の角振動数、 $k$ は波数ベクトルの大きさを示している。また縦軸は規格化 $\Omega = \omega a / 2\pi c$ である。

【0013】図2のエネルギーバンド構造において、 $\Gamma$ -X方向に進行する光に対してはエネルギーが $\Omega 1 \sim \Omega 2$ の範囲では光波モードが存在せず、「フォトニック・バンドギャップ(PBG)」と呼ばれる。

【0014】上記特開平10-90638号公報に開示されている光スイッチは、このPBGを、構成材料の屈折率の変化により制御させて、フォトニック結晶を伝搬する光をオン・オフさせるものである。即ち、この従来例では、エネルギー $\Omega 3$ の光は、PBG中であるために、光は伝搬できず、オフ状態であるが、外部からフォトニック結晶への制御光の照射、もしくは電流注入によ

って、フォトニック結晶を構成する材料の屈折率を変化させる。その結果、図2の実線のエネルギーバンド構造は、図2の点線で示すエネルギーバンド構造に変化し、 $\Omega 3$ の光に対して、伝搬モードが存在するようになってオン状態となる。逆に、エネルギー $\Omega 4$ の光波に対しては、屈折率変化によってオン状態からオフ状態に変化する。

【0015】上記特開平10-90638号公報に開示されている、フォトニック結晶を用いた光スイッチは、構成媒質の微小な屈折率の変化を利用しているが、被制御光の波長をエネルギーバンド端に設定することにより、光のオン・オフ効果を得ることができ、光スイッチとして機能する。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記の従来のフォトニック結晶を用いた光スイッチは、バルクとしてのフォトニック結晶自体が有している特性を利用したものであり、実際に光回路を形成するときに必要な光の導波、即ち、進行方向と垂直な方向における光の閉じ込めを全く考慮していないために、フォトニック結晶を伝搬してきた光の回収効率は、極めて低いものと思料される。

【0017】そこで、光を効率良く導波するために、フォトニック結晶を、基本伝搬モードの得られる $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 幅の導波路構造に細長く整形すると、図2に示すようなバルクのエネルギーバンドは崩れてしまい、このため、伝搬光のオン・オフ制御に必要なフォトニックバンドギャップが形成されなくなってしまう、という矛盾が生じる。

【0018】また、上記した従来の光スイッチは、全て1つのスイッチで1つのチャンネルのオン・オフを取り扱うため、マルチチャンネル化しようとする、必要なチャンネル数だけ光スイッチを用意する必要があった。

【0019】更に、従来の光スイッチは、全て、電流、電圧、光などの制御信号によって、信号光のオン・オフをしているため、制御信号の波形が劣化すると、信号光の波形も劣化してしまう、という問題がある。

【0020】したがって、本発明が解決しようとする課題の一つは、光を効率良く伝え、高速動作可能な、フォトニック結晶構造を有する光スイッチを提供することである。

【0021】また、後の説明からも明らかとされるように、本発明においては、1つの光スイッチで複数のチャンネルへの切り替えが可能なマルチチャンネル切り替え光スイッチを実現し、マルチチャンネルスイッチのコンパクト化を実現すること、あるいは、信号がオンの時の信号光強度を揃える波形整形機能を実現する光スイッチを提供すること、発明が解決しようとする課題としている。

【0022】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するための手段を提供する本発明は、スラブ型光導波路を有し、前記スラブ型光導波路のコアが、屈折率の異なる２種類以上の物質を周期的に規則正しく配列したフォトニック結晶構造を有する光スイッチであって、前記フォトニック結晶構造は線欠陥導波路を有し、前記線欠陥導波路の屈折率を変化させる手段を有する。ここで、スラブ型光導波路は、一層又は多層構造の平面の層状媒質で構成されており、面に沿った方向に光を伝搬する導波路をいう。本発明において、前記屈折率を変化させる手段は、電流注入であるか、あるいは、入射光とは別の制御光の照射よりなる。

【0023】また、本発明は、別のアスペクト (aspect) において、前記フォトニック結晶構造は、線欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型干渉系が構成されており、２つの分岐された光路の一方または両方に導波路の屈折率を変調する手段を有する。

【0024】また、本発明は、さらに別のアスペクト (aspect) において、前記フォトニック結晶は、入射光をフォトニック結晶の固有軸に対して斜めに入射することにより屈折させる手段と、フォトニック結晶の屈折率を変化させる手段とを有し、屈折率変化によってフォトニック結晶における屈折角を変化させる。本発明によれば、１つの光スイッチで複数のチャンネルへの切り替えが可能なマルチチャンネル切り替え光スイッチを実現し、マルチチャンネルスイッチのコンパクト化を実現している。

【0025】また、本発明は、さらにまた別のアスペクト (aspect) において、前記フォトニック結晶への入射光自身の強度変化に応じて、フォトニック結晶の屈折率が変化し、スイッチング動作をする。本発明によれば、信号がオンの時の信号光強度を揃える波形整形機能を実現している。

【0026】また、本発明は、さらに別のアスペクト (aspect) において、スラブ型フォトニック結晶の線欠陥導波路を用いた光スイッチにおいて、前記スラブ型フォトニック結晶のコア層は i 型、n 型又は p 型の半導体であり、前記コア層の前記線欠陥導波路を挟んで両側に n 型領域と p 型領域があり、それぞれの領域に n 型オーミック電極と p 型オーミック電極が形成されている。

【0027】本発明において、コア層の母材の導電型が n 型又は p 型であり、前記コア層の母材の導電型と同じ導電型の電極及びイオン注入領域が線欠陥光導波路から離れて設置されている。

【0028】

【発明の実施の形態】本発明の実施の形態について図面を参照して以下に説明する。図 3 は、本発明の第 1 の実施の形態の構成を示す図であり、図 3 (a) は、斜視図、図 3 (b) はフォトニック結晶層 38 の平面図を示

す。

【0029】図 3 (a) を参照すると、n 型基板 31 上に n 型半導体クラッド層 32 を備えており、その上に異なる屈折率を有する i 型半導体 (母体媒質) 33 および 34 から構成されるフォトニック結晶層 38 が形成されている。

【0030】さらに、その上に p 型半導体クラッド層 35 を備えており、電流注入のための電極 36 およびリード線 37 が付加されている。なお、n 型基板 31 は、グランド電位に接地されている。

【0031】母体媒質である i 型半導体 (母体媒質) 33 中に、i 型半導体 34 からなる円柱が、２次元三角格子状に埋め込まれた形 (周期構造を有する) であり、このうち i 型半導体 34 が、入射光 21 の入力端側から出力端側へ、直線上に、一列分だけ取り除かれており、母体媒質 33 に置き換えられている。以下、この領域 39 を、「線欠陥導波路」と呼ぶことにする。なお、円柱状の i 型半導体 34 は、空気、真空もしくは、絶縁体に置き換えてよい。

【0032】図 3 に示されるフォトニック結晶構造を有する光スイッチの作製法の具体例として、例えば次のような製法が用いられる。

【0033】n 型 InP からなる n 型基板 31 上に、有機金属化学気相法 (MOCVD) あるいは分子線エピタキシー法 (MBE) 等によって、InGaAsP からなる n 型クラッド層 32 および InGaAsP からなる i 型半導体 33 を積層する。i 型半導体 33 は、0.3 ~ 0.5  $\mu\text{m}$  程度の膜厚とされている。

【0034】その後、i 型半導体 33 上に、２次元三角格子のマスクパターンを形成し、フォトニック結晶を実現するための円柱穴をエッチングにより形成する。

【0035】エッチング終了後、マスクを除去し、i 型 InP を成長すると、円柱穴が優先的に埋め戻され、i 型半導体 34 が形成される。

【0036】その後、さらに InP からなる p 型クラッド層 35 を積層し、電極 36 およびリード線 37 を付ける。

【0037】なお、エッチング終了時に、マスク除去後、あらかじめ InP からなる p 型クラッド層 35 を積層した基板を、InGaAsP からなる i 型半導体 33 に貼り付け、エッチングによって、p 型クラッド層 35 を残すという方法もある。この時、i 型半導体 34 は、空気となる。電極、リード線の付着方法は、前述したものと同一である。

【0038】次に、本発明の第 1 の実施の形態の動作原理について説明する。図 4 は、TM 偏波に対するエネルギーバンドを示す図である。以下、偏波は、TM のみに対して議論する。

【0039】線欠陥導波路以外のフォトニック結晶領域においては、電流注入等により屈折率変化を起こさない

場合には、図4の実線がエネルギーバンド構造となり、 $\Omega 5 \sim \Omega 6$ の光波は、2次元平面内では伝搬モードが存在しない。

【0040】従って、入射光21のエネルギーが $\Omega 5 \sim \Omega 6$ であれば、2次元平面内では導波路の外側、すなわち、フォトニック結晶領域には、光は伝搬できないために、上記線欠陥導波路に、強く閉じ込められる。例えば、エネルギーが $\Omega 7$ の光は、これに相当する。従って、格子ピッチの大きさであるサブ $\mu\text{m}$ 程度の微小な導波路が実現可能となる。

【0041】2次元平面に垂直な方向に対しては、上下のクラッド層32、35の屈折率およびその層厚を、適切に選ぶことによって、コアであるフォトニック結晶層に、光が高効率に閉じ込めることができる。かかる構成により、本実施例の光スイッチにおいては、3次的に光を閉じこめることで、低損失で伝搬し、出射光22を得ることができる。

【0042】続いて、電流注入をした場合を説明する。フォトニック結晶層のキャリア数が増加することで（プラズマ効果により）、フォトニック結晶を構成するi型半導体33または34の少なくとも一方の屈折率が変化し、エネルギーバンドは、図4の点線のように変化する。この時、エネルギー $\Omega 7$ の光に対しては、フォトニックバンドギャップ（PBG）から外れてしまうため、線欠陥導波路の外側である完全なフォトニック結晶領域へと光が漏れ、線欠陥導波路を伝搬するうちに、その強度が減衰し、透過する出射光22の強度は、極めて弱いものとなる。

【0043】同じ原理に基づいて、入射光21のエネルギーが $\Omega 8$ の場合には、エネルギーが $\Omega 7$ の場合とは、逆に、電流注入により、出射光強度は、オフ状態からオン状態に変化する。

【0044】図5は、上記で説明した動作原理に基づいて、電流をオン／オフしたとき（電流注入の有無に応じた）の出射光強度を、タイミングチャートで示した図である。電極36を通して電流注入をした場合に、エネルギー $\Omega 7$ の出射光の強度（図5の出射光強度 $\Omega 7$ ）は、ゼロ、すなわち、オフ状態であり、電流注入をしない場合には、オン状態となっている。エネルギーが $\Omega 8$ の出射光の強度（図5の出射光強度 $\Omega 8$ ）は、出射光強度 $\Omega 7$ の場合とは、そのオン、オフが逆となっている。

【0045】ここでは、フォトニック結晶として、2次元三角格子を例にとったが、正方格子、正六角形格子等の他の2次元フォトニック結晶、あるいはダイヤモンド構造等の3次元フォトニック結晶であってもよい。

【0046】また、フォトニック結晶を構成する材料として、 $\text{InGaAsP}$ を挙げたが、その他の材料系でも構わない。さらに、屈折率を変化させる手段として、順バイアス印加による電流注入を挙げたが、逆バイアス印加による屈折率変化（フランツ・ケルディッシュ効果）

を利用しても同様の効果が得られる。

【0047】次に、本発明の第2の実施の形態について説明する。図11は、本発明の第2の実施の形態の構成を示す図である。図11を参照すると、フォトニック結晶の周期構造を有するコア層72が上下2つのクラッド層71、73に挟まれた構造が、基板70上に形成されている。

【0048】前記した第1の実施の形態と異なり、本発明の第2の実施の形態において、基板70の材料は任意とされており、クラッド層71、73は誘電体よりなる。クラッド層73表面には、電極74、75が設けられている。

【0049】フォトニック結晶の周期構造を有するコア層とそれを挟むクラッド層全体、即ち図11では、コア層72と、クラッド層71、73を併せた構造を、「スラブ型フォトニック結晶」と呼ぶことがある。クラッド層71、73は空気でもよい。

【0050】コア層71は、半導体よりなり、導電性が小さく導電損失の小さいi型、n型（弱いn型）又はp型（弱いp型）である。

【0051】クラッド層73には孔が開けられており、その孔（ビア）を通して、電極74、75がコア層72の電極80、81に接続している。

【0052】図12は、本発明の第2の実施の形態の構成を示す図であり、図11に示した構造を上方から透視した図である。i型、n型又はp型半導体のコア層76は、フォトニック結晶構造を有し、線欠陥光導波路77が形成されている。

【0053】コア層76の、線欠陥光導波路77を挟んで両側に、n型領域78とp型領域79が配設されており、それぞれの領域に、n型オーミック電極80又はp型オーミック電極81が形成されている。

【0054】本発明の第2の実施の形態の動作原理は、前記した本発明の第1の実施の形態と同じである。即ち、スイッチングしたい光信号のエネルギーは、スラブ型フォトニック結晶のフォトニックバンドギャップ内にあり、フォトニック結晶中に形成された線欠陥光導波路は、電極に、電流を注入するかあるいは電圧を印加する前は、フォトニックバンドギャップ内に伝搬モードを有する。

【0055】電極80と電極81の間に電流を注入するか、あるいは、逆バイアス電圧を掛けると、光が伝搬する線欠陥光導波路の周囲のフォトニック結晶のフォトニックバンド構造が変化し、線欠陥導波路の伝搬モードがフォトニックバンドギャップ外に出て、線欠陥導波路を光が伝搬できなくなる。

【0056】あるいは、元々、フォトニックバンドギャップ外にあった線欠陥導波路の伝搬モードが、電流、又は電圧の印加により、フォトニックバンドギャップ内に移行し、光を伝搬できるようになる。

【0057】本発明の第2の実施の形態の利点は、クラッド層として、非導電性の誘電体を用いることができるため、線欠陥導波路77を伝搬する光のクラッド層71、73による損失が無い。

【0058】次に、本発明の第2の実施の形態の具体例について以下に説明する。ノンドープSi（膜厚300nm）/SiO<sub>2</sub>（膜厚2μm）/ノンドープSi基板構造のSOIウェハのノンドープSi層に、電子ビーム描画と塩素ガスによるSiドライエッチング加工により、図12に示すような、三角格子フォトニック結晶構造と線欠陥導波路を形成する。

【0059】フォトリソグラフィによりマスクを形成した後、砒素やボロンのイオン注入とその後の活性化アニール処理によって、n型領域78とp型領域79に相当する領域を形成する。その後、各イオン注入領域にオーミック金属を蒸着し、シンタリングを行って電極を形成する。n型領域78とp型領域79を形成するためのイオン注入は、フォトニック結晶構造を形成する前に行ってもよい。また、コア層の母材の導電型がn型又はp型の半導体の場合、コア層の母材の導電型と同じ導電型の電極（従ってイオン注入領域も）は線欠陥光導波路の近くにある必要は無く、離れていてもよい。

【0060】この実施の形態の光スイッチを複数並設する場合には、線欠陥導波路の近くに設置する電極はコア層と反対の導電型の電極のみで、同じ導電型の電極は共通のものを線欠陥光導波路から離れたところに、最低1つ以上用意するようにしてもよい。

【0061】次に、本発明の第3の実施の形態について説明する。図6は、本発明の第3の実施の形態の構成を示す図である。図6を参照すると、この実施の形態と、図3に示した前記第1の実施の形態との違いは、フォトニック結晶を構成する半導体の屈折率を変化させる手段として、入射光21とは別の制御光41を用いていることである。

【0062】本発明の第3の実施の形態の動作原理について説明する。図4のエネルギーバンドにおいて、制御光41を照射しない時、エネルギーバンドは実線で示されるが、制御光41を照射した時には、キャリアが励起されることで、フォトニック結晶を構成するi型半導体33または34の屈折率が変化し、エネルギーバンドが、例えば図4の点線のように変化する。よって、前記第1の実施の形態と同様に、入射光21のエネルギーがΩ7であれば、制御光41の照射の有無（オン/オフ）で、出力光22をオン/オフできる。

【0063】なお、光照射による屈折率変化を起こす要因として、フォトニック結晶におけるキャリア数の変化（プラズマ効果）を挙げたが、媒質の3次の非線形光学特性である、光カー効果も考えられる。光カー効果は、制御光41を照射したときの媒質の屈折率nが、非照射の屈折率n0と、3次の非線形光学定数に比例するn

2、光強度Iとして、

$$n = n_0 + n_2 * I \quad (\text{式1})$$

と表される現象である。

【0064】次に、本発明の第4の実施の形態について説明する。図7は、本発明の第4の実施の形態の構成を示す図であり、フォトニック結晶構造の平面図である。図7を参照すると、この実施の形態では、線欠陥導波路を用いて、マッハツェンダー型の干渉系を構成している。2つの電極36、36'は、分岐された2つのチャネルに効率的にキャリアを注入できるように付着されている。

【0065】次に、本発明の第4の実施の形態の動作原理について説明する。入射光21は線欠陥導波路からY分岐路によって上下枝2つの光路40、40'に等分配され、2つの光路を伝搬した光が、別のY分岐路によって合波されて出射光22となって出力される。電流注入を行わない場合、上下枝の光路長は等しいため、分岐された2つの光の位相差は零（同位相）であるから、その干渉光である出力光22の光強度は最大となる。なお、2つの光路長が異なっても、光路長差が波長の整数倍となるように設計しておけば、位相差が零の場合と等価である。

【0066】次に、上枝、下枝の少なくとも一方の電極を通して電流注入を行うことで屈折率を変化させると、その部分の実効的な光路長が変化する。上下枝での光路40、40'でπの位相差が生じたとすれば、干渉光である出力光22は、弱め合い光強度は最小となる。

【0067】このようにして、注入電流のオン/オフで、出射光22をオン/オフすることができる。なお、屈折率変化を起こす手段として、電流注入に限らず、逆バイアスの印加、入射光とは、別の制御光の照射であってもよい。

【0068】次に、本発明の第5の実施の形態について説明する。図8は、本発明の第5の実施の形態の構成を示す図である。図8を参照すると、この実施の形態では、フォトニック結晶50には、線欠陥導波路は導入されていず、完全結晶である。これは、スーパーブリズム現象を利用した光スイッチである。スーパーブリズム現象に関しては、文献（Applied Physics Letters vol.74 p.1370-1372 (1999)）に掲載されている通り、僅か1%の波長差で屈折角が50度以上も変化するという異常な分散特性である。

【0069】別の見方をすると、入射する光の波長を固定した時、屈折率を僅かに変化させることで、エネルギーバンドが変化し、それに応じて屈折角が大きく変化することが分かる。

【0070】つづいて本発明の第5の実施の形態の動作原理について、図8を参照して説明する。電流注入前の導波路51を介して、フォトニック結晶50の固有軸（Γ-XあるいはΓ-J）に対して斜めに入射され、フ



フォトニック結晶中を伝搬する光の軌跡は、フォトニック結晶の分散特性によって、図8の実線矢印で示されるとする。この時は、チャンネル1 (ch1) の導波路52へ光が出力される。

【0071】電流注入を行うと、フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率が変化し、それに応じて屈折角が変化することで、伝搬光の軌跡は、図8の波線矢印へと変化し、チャンネル2 (ch2) の導波路52' へと光が出力されることになる。

【0072】上記では、出力側の導波路が2つからなる例について説明したが、出力側の導波路は3つ以上、あるいは1つとしても良い。また、屈折率を変化させる手段は、電流注入以外にも、逆バイアスの印加、入射光とは別の制御光の照射など、他の手段であってもよいことは勿論である。

【0073】次に、本発明の第6の実施の形態について説明する。図9は、本発明の第6の実施の形態の構成を示す図である。フォトニック結晶は、2次元平面内において、光の伝搬方向に垂直な方向の幅が1~2  $\mu\text{m}$ 程度の導波路60となっており、導波路60の両側は、クラッド層61、61' によって挟まれている。本発明の第6の実施の形態は、入射光21それ自身の強度による、スイッチングを行うものである。

【0074】続いて、本発明の第6の実施の形態の動作原理について、図4および図10を参照して説明する。

【0075】はじめに、入射光21のエネルギーが $\Omega_8$  (図4参照) である場合について説明する。入射光強度が弱い場合には、エネルギーバンドは、図4の実線で表され、この時、PBGの外側であるから、完全結晶である導波路部分を光は伝搬することができる。ところが、入射光強度をある程度強くすると、式(1)で表されるように、入射光の強度自身によって、フォトニック結晶の屈折率が変化し、それに伴ってエネルギーバンドが、図4の点線のように変化し、フォトニックバンドギャップ(PBG)内となるため、光は伝搬することができなくなる。

【0076】これに基づき、エネルギー $\Omega_8$ の入射光強度に対して、出射光強度をプロットしたグラフが、図10(a)である。入射光強度がある程度強くなると、出射光強度が頭打ちになり、その後は、次第に低下する。これは、リミッター機能といえる。このリミッター機能は、信号がオンの時の信号光強度を揃える整形機能として利用できる。

【0077】一方、エネルギーが $\Omega_7$  (図4参照) の入射光に対しては、エネルギーが $\Omega_8$ の場合と逆で、図10(b)に示すように、入射光強度が小さいときには透過光強度が小さく、入射光強度が大きくなると透過光強度が飛躍的に増大する。この機能は、信号がオンとオフの時の信号光強度のコントラストを増大させる機能を有する。リミッター機能とコントラスト増大機能の組み合

わせが可能なのは勿論である。

【0078】上記第3乃至第6の実施の形態においても、図1、及び図11を参照して説明した第1、第2の実施の形態と同様に、フォトニック結晶構造によるコア層の上下をクラッド層で挟む構成としてもよいことは勿論である。

【0079】上記各実施の形態によれば、スイッチングの動作波長は構成材料の特性ではなく、フォトニック結晶の構造により決まるため、設計の自由度が大きくなり、フォトニック結晶を用いることで機能素子のコンパクト化が実現される。フォトニック結晶は、光通信において用いられている平面型微小光回路、半導体レーザ等は導波路構造を有しており、これらとの整合性をとる上でも導波路構造になっていることが望ましい。

【0080】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、3次的に光閉じこめを行い、光を効率良く導波し、高速動作を可能とする、という効果を奏する。そして、本発明によれば、スイッチングの動作波長は構成材料の特性ではなく、フォトニック結晶の構造により決まるため、設計の自由度を増大する。

【0081】また本発明によれば、1つの光スイッチで複数のチャンネルへの切り替えが可能なマルチチャンネル切り替え光スイッチを実現し、マルチチャンネルスイッチのコンパクト化を実現している。

【0082】さらに本発明によれば、信号がオンの時の信号光強度を揃える波形整形機能を実現している。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は2次元フォトニック結晶の構造例を上面から見た図である。(b)は2次元フォトニック結晶構造に対する逆格子ベクトルの方向を示した図である。

【図2】図1(a)の構造に対するエネルギーバンドの計算例を示す図である。

【図3】(a)は本発明の第1の実施の形態の構成を示す図である。(b)は(a)のフォトニック結晶層の構成を示す図である。

【図4】図3の構造に対するエネルギーバンドの計算例を示す図である。

【図5】本発明の第1の実施の形態の動作を示すタイミングチャートである。

【図6】本発明の第3の実施の形態の構成を示す図である。

【図7】本発明の第4の実施の形態の構成を示す図である。

【図8】本発明の第5の実施の形態の構成を示す図である。

【図9】本発明の第6の実施の形態の構成を示す図である。

【図10】本発明の第6の実施の形態の動作を説明するための図である。

15

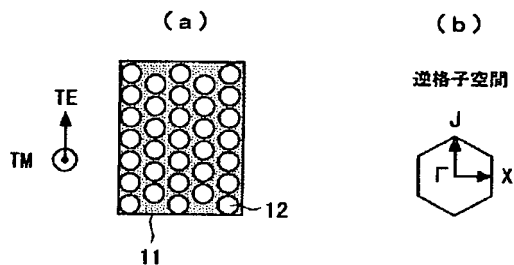
【図11】本発明の第2の実施の形態の構造を示す図である。

【図12】本発明の第2の実施の形態の構成を示す図である。

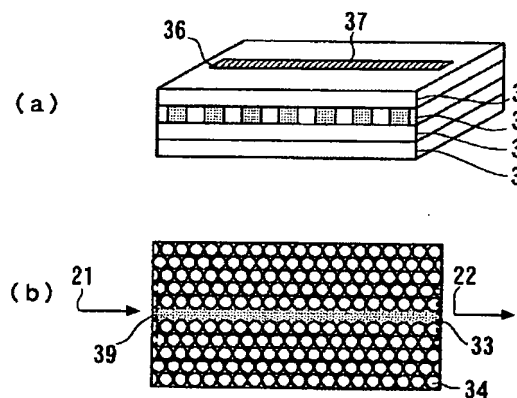
【符号の説明】

- 11 第1の媒質
- 12 第2の媒質
- 21 入射光
- 22 出射光
- 31 n型基板
- 32 n型クラッド層
- 33 i型半導体（母体媒質）
- 34 i型半導体
- 35 p型クラッド層
- 36、36' 電極
- 37 リード線
- 38 i型フォトニック結晶層
- 39 線欠陥導波路

【図1】



【図3】



16

\* 40、40' 分岐した導波路

41 制御光

50 フォトニック結晶

51 チャンネル導波路

52、52' チャンネル導波路

60 導波路

61、61' クラッド層

70 基板

71 クラッド層

10 72 コア層

73 クラッド層74、

75 電極

76 コア層

77 線欠陥導波路

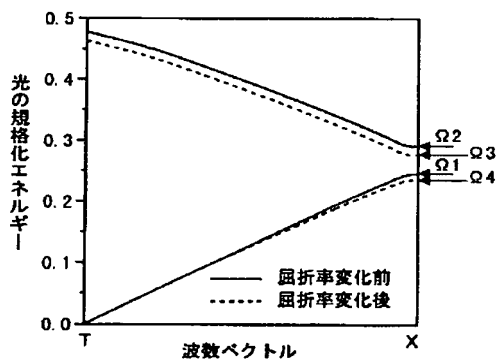
78 n型領域

79 p型領域

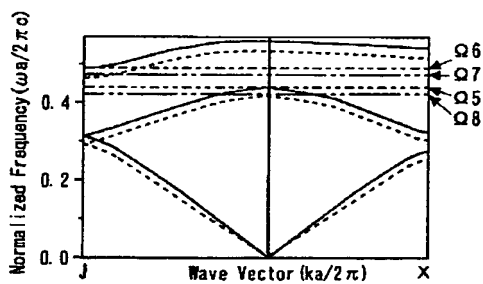
80 n型オーミック電極

\* 81 p型オーミック電極

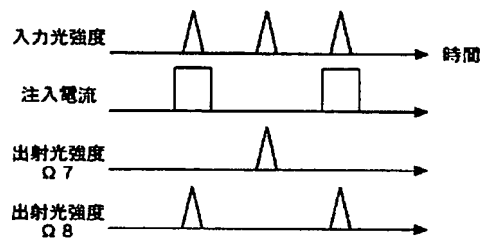
【図2】



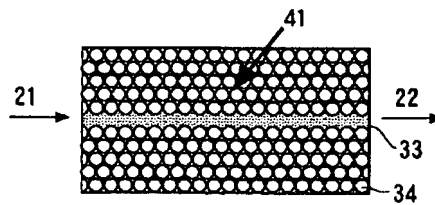
【図4】



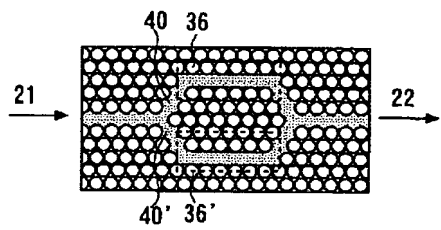
【図 5】



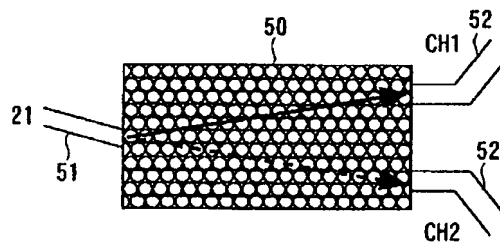
【図 6】



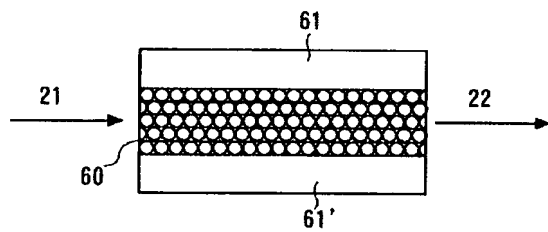
【図 7】



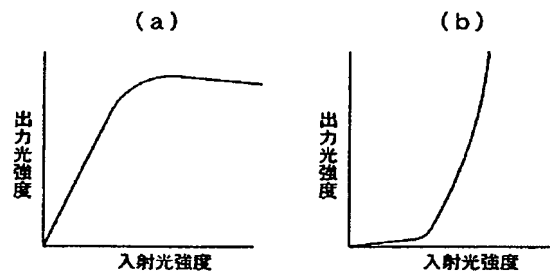
【図 8】



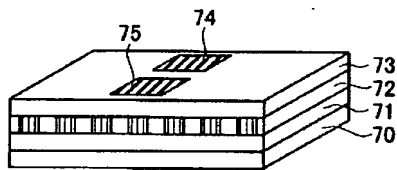
【図 9】



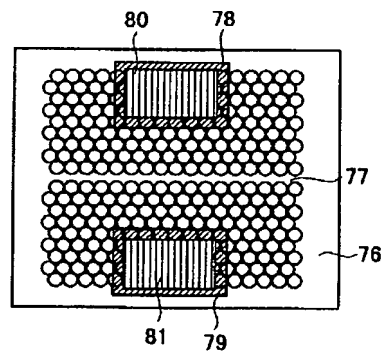
【図 10】



【図 11】



【図 12】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード (参考)
G 0 2 F 1/313		G 0 2 B 6/12	Z N J
F ターム (参考)	2H047 KA03 LA12 RA08 TA43 2H079 AA02 AA08 AA12 AA13 BA01 CA05 DA16 EA02 EA05 2K002 AA02 AB04 BA01 BA06 BA08 CA13 CA30 DA05 DA08 HA08		